

Αντικαταστάσεις στο νερό και στα λύματα ως αναδυόμενοι ρύποι. Κίνδυνοι για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία λόγω ρύπανσης των καλλιεργειών.

Ονοματεπώνυμο: Δημήτριος Ρούτσιος
Μεταπ. Φοιτητής ΚΥΚ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ
Email: d.routsios@gmail.com, std523173@ac.eap.gr

Δρ. Πέτρος Κόκκινος
Αναπλ. Καθ.-Διευθυντής ΔΠΜΣ ΚΥΚ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ
Email: pkokkin@eap.gr

Δρ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΜΑΝΤΖΟΥΚΑΣ
Εντεταλμένος Ερευνητής ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ

Περίληψη – Τα αντικαταστάσεις στο νερό και στα λύματα ως αναδυόμενοι ρύποι των υδάτινων οικοσυστημάτων, εξαιτίας της αυξανόμενης κατανάλωσής τους και της μετέπειτα απόρριψής τους στο περιβάλλον. Η παρούσα εργασία εξετάζει την παρουσία αντικαταστάσεων φαρμάκων σε νερά και λύματα, τη μεταφορά και συσσώρευσή τους σε γεωργικές καλλιέργειες, καθώς και τους κινδύνους που εγκυμονούν για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία λόγω της ρύπανσης αυτής. Οι κύριοι στόχοι της μελέτης είναι: (1) η κατανόηση των οδών μέσω των οποίων τα αντικαταστάσεις εισέρχονται στους υδατικούς πόρους και τις τροφικές αλυσίδες, (2) η αξιολόγηση των οικολογικών και τοξικολογικών επιπτώσεών τους, και (3) η διερεύνηση τεχνολογικών λύσεων και ρυθμιστικών πλαισίων για τον μετριασμό του προβλήματος. Η μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ανάλυση περιπτώσεων ρύπανσης και συγκριτική αξιολόγηση τόσο προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας νερού όσο και ισχυόντων κανονισμών. Συγκεντρώθηκαν δεδομένα για τις συγκεντρώσεις κοινών αντικαταστάσεων (π.χ. οσελταμιβίρη, λαμβιδουδίνη, ρεμδεσιβίρη) σε λύματα, επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, καθώς και παραδείγματα ανίχνευσής τους σε εδάφη φυτά. Παρουσιάζονται περιπτώσεις περιοχών όπου η άρδευση με ανεπαρκώς επεξεργασμένα λύματα οδήγησε σε ρύπανση γεωργικών προϊόντων, υπογραμμίζοντας τον κίνδυνο για τους καταναλωτές. Επιπλέον, συγκρίνονται διάφορες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων (συμβατικές και προηγμένες) ως προς την ικανότητά τους να απομακρύνουν αντικαταστάσεις φαρμάκων, ενώ εξετάζονται διεθνείς και ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες για τη ρύθμιση των φαρμακευτικών ρύπων. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι υπολείμματα αντικαταστάσεων ανιχνεύονται παγκοσμίως στα ύδατα περιβάλλοντα και μπορούν να εισχωρήσουν στην αγροδιατροφική αλυσίδα μέσω άρδευσης. Παρότι οι συγκεντρώσεις τους στα τρόφιμα είναι χαμηλές, οι ενδεχόμενοι κίνδυνοι δεν μπορούν να αγνοηθούν. Οι συμβατικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων αδυνατούν να αφαιρέσουν πλήρως αυτούς τους μικρορύπους, οδηγώντας σε τοξικές επιδράσεις σε υδρόβιους οργανισμούς και συσσώρευση σε εδάφη καλλιεργειών. Παράλληλα, υφίστανται σημαντικά κενά στο ρυθμιστικό πλαίσιο, καθώς επί του παρόντος δεν υπάρχουν σαφή όρια για τα περισσότερα φαρμακευτικά υπολείμματα σε νερό και τρόφιμα. Η μελέτη τεκμηριώνει την ανάγκη ανάπτυξης πιο αποδοτικών τεχνολογιών επεξεργασίας (όπως οξόνωση, προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα, προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες και βιοαντιδραστήρες μικροφυκών) για αποτελεσματική απομάκρυνση των αντικαταστάσεων ρύπων. Τέλος, προτείνονται συγκεκριμένες κατευθύνσεις πολιτικής – μεταξύ των οποίων η θέσπιση ευρωπαϊκής στρατηγικής για τα φαρμακευτικά στο περιβάλλον – ώστε να διασφαλιστεί η

προστασία οικοσυστημάτων και δημόσιας υγείας στο πλαίσιο βιώσιμης και κυκλικής διαχείρισης του νερού.

Λέξεις-Κλειδιά: αντικαταστάσεις φαρμάκων, αναδυόμενοι ρύποι, φαρμακευτικά κατάλοιπα, λύματα, επαναχρησιμοποίηση υδάτων, άρδευση, γεωργικές καλλιέργειες, βιοσυσσώρευση, οικοτοξικότητα, δημόσια υγεία, κυκλική οικονομία, προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας, ρυθμιστικό πλαίσιο, ανθεκτικότητα, One Health.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φαρμακευτικά προϊόντα έχουν αναγνωριστεί ως “ρύποι αναδυόμενης ανησυχίας” (Contaminants of Emerging Concern – CECs) στο περιβάλλον, καθώς η παρουσία τους σε ύδατα και εδάφη εγείρει νέες προκλήσεις για τα οικοσυστήματα και τη δημόσια υγεία. Ιδιαίτερα τα αντικαταστάσεις φαρμάκων – μια κατηγορία δραστικών ουσιών για την αντιμετώπιση ιογενών λοιμώξεων – παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση χρήσης τις τελευταίες δεκαετίες. Σύμφωνα με επιδημιολογικές μελέτες, η παγκόσμια κατανάλωση αντικαταστάσεων εκτινάχθηκε κατά τη διάρκεια πρόσφατων υγειονομικών κρίσεων, όπως η πανδημία COVID-19 [1], [2]. Για παράδειγμα, φάρμακα όπως η φαβιπιραβίρη και η ρεμδεσιβίρη χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στην πανδημία [1], με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται σε λύματα και επιφανειακά ύδατα σε συγκεντρώσεις δεκάδων νανογραμμάρων ανά λίτρο. Επιπλέον, σημαντικό ποσοστό της δόσης των χορηγούμενων αντικαταστάσεων (κατά μέσο όρο ~80%) απεκκρίνεται αναλλοίωτο από τον οργανισμό [3]. Αυτό σημαίνει ότι μεγάλες ποσότητες καταλήγουν στα αστικά λύματα μέσω ούρων και κοπράνων, ασκώντας πίεση στις υποδομές επεξεργασίας.

Τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων δεν σχεδιάστηκαν για την πλήρη απομάκρυνση τέτοιων μικρορύπων [4], [5], [6]. Μελέτες έχουν δείξει ότι ενώ ορισμένα αντικαταστάσεις βιοδιασπώνται μερικώς στις μονάδες επεξεργασίας, άλλα παραμένουν ανθεκτικά και απαιτούν προηγμένες μεθόδους για την απομάκρυνσή τους. Ως αποτέλεσμα, υπολείμματα δραστικών αντικαταστάσεων και των μεταβολιτών τους εντοπίζονται στις επεξεργασμένες εκροές που εκβάλλουν σε ποτάμια, λίμνες ή στη θάλασσα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του δραστικού μεταβολίτη της οσελταμιβίρης (oseltamivir carboxylate), ο οποίος ανιχνεύθηκε σε ποτάμια του Ηνωμένου Βασιλείου

κατά τις περιόδους έξαρσης της εποχικής γρίπης [7]. Η παρουσία τέτοιων ουσιών στα υδάτινα οικοσυστήματα έχει συσχετιστεί με οικοτοξικολογικές επιδράσεις – π.χ. διαταραχή φυσιολογίας υδρόβιων οργανισμών – και με την ανάπτυξη ανθεκτικών στελεχών ιών [8]. Συγκεκριμένα, η συνεχής έκθεση άγριων οργανισμών (π.χ. υδρόβια πτηνά) σε χαμηλές συγκεντρώσεις αντικών μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση ανθεκτικών ιών, καθιστώντας το περιβάλλον μια πιθανή “δεξαμενή” ανάπτυξης ιικής αντοχής.

Πέρα από το υδάτινο περιβάλλον, αυξανόμενα δεδομένα φέρνουν στο προσκήνιο τη ρύπανση γεωργικών καλλιεργειών από αντικά φάρμακα. Αντικά που παραμένουν στο νερό άρδευσης ή στη λυματολάσπη δύνανται να απορροφηθούν από φυτά μέσω του ριζικού συστήματος. Μελέτες πεδίου τεκμηριώνουν ότι λαχανικά και δημητριακά που αρδεύονται με επαναχρησιμοποιούμενα λύματα συσσωρεύουν φαρμακευτικές ουσίες στους ιστούς τους. Για παράδειγμα, σε μελέτη στη Νότια Αφρική ανιχνεύθηκαν τρία ευρέως χρησιμοποιούμενα αντιρετροϊκά – αβακαβίρη, νεβιραπίνη, εφাবιρένζη [9], [10] – σε βρώσιμα λαχανικά, με συγκεντρώσεις έως 8,18 μg ανά κιλό νοπού βάρους. Επίσης, αντικά κατά του HIV (λαμβιβουδίνη, νεβιραπίνη) έχουν εντοπιστεί σε υδρόβια φυτά κοντά σε εκροές λυμάτων. Η συσσώρευση φαρμάκων σε καλλιέργειες – συμπεριλαμβανομένων και θερμοκηπιακών – εγείρει ανησυχία: σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, όπου η ανακυκλοφορία θρεπτικών διαλυμάτων μπορεί με τον καιρό να οδηγήσει σε υψηλότερες συγκεντρώσεις μικρορύπων, αυξάνοντας τον κίνδυνο βιοσυσσώρευσης.

Η δημόσια υγεία συνδέεται άμεσα με τα παραπάνω: η κατανάλωση τροφίμων ή νερού που περιέχουν ίχνη φαρμάκων συνεπάγεται χρόνια έκθεση του πληθυσμού σε φαρμακολογικά δραστικές ουσίες. Αν και οι συγκεντρώσεις είναι χαμηλές, η μακροχρόνια λήψη υπο-θεραπευτικών δόσεων αντικών θα μπορούσε να συμβάλει στην εμφάνιση ανεπιθύμητων ενεργειών ή/και ανθεκτικών ιών. Παράλληλα, τίθενται ηθικά και ρυθμιστικά ερωτήματα για την ποιότητα τροφίμων και νερού. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας του νερού, το ζήτημα αποκτά ιδιαίτερη σημασία: πρακτικές επαναχρησιμοποίησης νερού (για άρδευση) ή λυματολάσπης (ως λιπάσματος) συμβάλλουν στη βιώσιμη διαχείριση πόρων, αλλά μπορεί να επανεισάγουν αντικά φάρμακα στο περιβάλλον αν δεν υπάρξει κατάλληλη πρόνοια. Συνολικά, απαιτείται ολιστική προσέγγιση που να συνυπολογίζει τόσο την προστασία του περιβάλλοντος, όσο και την ανθρώπινη υγεία.

Συνοπτικά, η σημασία και η καινοτομία της παρούσας μελέτης έγκειται στο ότι συνδυάζει πολλαπλούς άξονες: (α) διερευνά συνολικά την παρουσία και τύχη των αντικών φαρμάκων στο υδάτινο περιβάλλον και στις αγροτικές καλλιέργειες, (β) αξιολογεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, και (γ) εξετάζει τεχνολογικές λύσεις και ρυθμιστικές παρεμβάσεις σε ένα ενιαίο πλαίσιο βιώσιμης, κυκλικής διαχείρισης των υδάτων. Μέχρι σήμερα, οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται είτε μόνο στην περιβαλλοντική παρουσία φαρμάκων, είτε μόνο στους κινδύνους ή στις τεχνολογίες αντιμετώπισης. Στην παρούσα μελέτη, επιχειρείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση της ρύπανσης

από φαρμακευτικές ουσίες, των γεωργικών πρακτικών και της δημόσιας υγείας. Έμφαση δίνεται στα αντικά – μια κατηγορία ρύπων λιγότερο μελετημένη συγκριτικά με τα αντιβιοτικά – και μάλιστα σε ένα επίκαιρο πλαίσιο αυξημένης χρήσης τους (π.χ. πανδημία COVID-19). Επιπλέον, η εργασία ενσωματώνει τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα και προτείνει συνδυαστικές στρατηγικές διαχείρισης που συνταιριάζουν τεχνολογικές και πολιτικές λύσεις.

II. ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει στοιχεία καινοτομίας, τα οποία συνοψίζονται ως εξής: Πρώτον, εστιάζει ειδικά στα αντικά φάρμακα ως ρύπους. Πρόκειται για μια υποκατηγορία φαρμακευτικών ρύπων που έχει λάβει σχετικά μικρή ερευνητική προσοχή μέχρι σήμερα, σε αντίθεση με τα αντιβιοτικά για τα οποία υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία [3], [11]. Δεύτερον, ακολουθεί μια πολυδιάστατη προσέγγιση: συνδυάζει την περιβαλλοντική διάσταση (παρουσία αντικών σε ύδατα, εδάφη και βιολογικούς οργανισμούς, οικοτοξικότητα) με τη διάσταση της δημόσιας υγείας (έκθεση του ανθρώπου μέσω ρυπασμένων τροφίμων και νερού). Αυτή η προσέγγιση ευθυγραμμίζεται με την αρχή Ενιαία Υγεία (One Health) [12], που αναγνωρίζει ότι η υγεία περιβάλλοντος, ζώων και ανθρώπων είναι αλληλένδετες. Τρίτον, αξιοποιούνται επίκαιρα δεδομένα: συμπεριλαμβάνονται τα πιο πρόσφατα στοιχεία – π.χ. από την περίοδο της πανδημίας COVID-19 [1], [2] όπου εκτοξεύθηκε η χρήση αντικών φαρμάκων – ώστε τα συμπεράσματα να αντανακλούν τις τρέχουσες συνθήκες. Τέλος, προτείνονται ολιστικές λύσεις: η εργασία δεν περιορίζεται στην ανάλυση του προβλήματος, αλλά προχωρά στην πρόταση συνδυαστικών στρατηγικών διαχείρισης που περιλαμβάνουν τόσο τεχνολογικές και μηχανικές λύσεις, όσο και ρυθμιστικές-πολιτικές παρεμβάσεις. Όλες οι λύσεις εντάσσονται σε ένα ενιαίο πλαίσιο βιώσιμης και κυκλικής διαχείρισης νερού. Συνολικά, γίνεται σύνθεση δεδομένων και εννοιών από διαφορετικά πεδία (περιβαλλοντική χημεία, τοξικολογία, γεωργία, τεχνολογία υδάτων, δημόσια υγεία) για να αποτυπωθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του προβλήματος των αντικών ρύπων και να προταθούν τεκμηριωμένες λύσεις.

III. ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

Σκοπός της έρευνας είναι να διερευνηθεί η έκταση και η επίπτωση της ρύπανσης από αντικά φάρμακα στο υδάτινο περιβάλλον και στις γεωργικές καλλιέργειες, καθώς και να αξιολογηθούν οι κίνδυνοι για το οικοσύστημα και τη δημόσια υγεία. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, τέθηκαν συγκεκριμένοι ερευνητικοί στόχοι και ερωτήματα:

1. Χαρτογράφηση διαδρομών ρύπανσης: Πώς εισέρχονται τα αντικά φάρμακα στους υδατικούς πόρους και στις γεωργικές καλλιέργειες; Ποιες είναι οι κύριες πηγές και οδοί μεταφοράς των αντικών ρύπων από την ανθρώπινη χρήση (ή και κτηνιατρική χρήση) προς το περιβάλλον; (Σχετικό ερώτημα: Ποια είναι η “διαδρομή”

ενός αντικίου από την κατανάλωση του ασθενούς μέχρι την πιθανή ανίχνευσή του στο νερό και στα φυτά;) Αυτός ο στόχος αντιστοιχεί στην κατανόηση των μηχανισμών ρύπανσης, όπως η απέκκριση και διάθεση φαρμάκων, η μεταφορά μέσω αποχετευτικών δικτύων, οι εκπομπές από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, η χρήση επαναχρησιμοποιημένου νερού στην άρδευση, κ.ά..

2. Αξιολόγηση οικολογικών και υγειονομικών επιπτώσεων: Τι επιπτώσεις έχουν αυτά τα φάρμακα στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα, καθώς και στην ανθρώπινη υγεία; Εξετάζονται οι γνωστές ή οι πιθανές οικοτοξικές επιδράσεις στους υδρόβιους οργανισμούς, στις μικροβιακές κοινότητες εδάφους και στα φυτά, συμπεριλαμβανομένων υπο-θανατηφόρων επιδράσεων (π.χ. στρες στα φυτά) και κινδύνων ανάπτυξης ανθεκτικών ιών. Παράλληλα, αξιολογείται η πιθανή έκθεση του ανθρώπου μέσω επιμολυσμένων τροφίμων και νερού και οι τυχόν χρόνιες επιπτώσεις αυτής της έκθεσης. (Ενδεικτικά ερωτήματα: Μπορούν οι συγκεντρώσεις αντικών στα τρόφιμα να επηρεάσουν τον άνθρωπο; Μπορεί η παρουσία αντικών στο περιβάλλον να ευνοήσει την ανάπτυξη ανθεκτικών παθογόνων;)

3. Αντιμετώπιση – τεχνολογικές λύσεις και πολιτικές: Πώς μπορεί να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα; Εξετάζονται προτεινόμενες τεχνολογικές λύσεις για την απομάκρυνση των αντικών ρύπων (π.χ. αναβάθμιση μονάδων επεξεργασίας λυμάτων με τεχνολογίες οζόνωσης, ενεργού άνθρακα, μεμβρανών, βιοαντιδραστήρων), καθώς και θεσμικά μέτρα και πολιτικές (π.χ. καθορισμός ορίων συγκέντρωσης, ενσωμάτωση των αντικών στη νομοθεσία για το νερό, προγράμματα συλλογής ληγμένων φαρμάκων, ευαισθητοποίηση κοινού). (Ερωτήματα: Ποιες υπάρχουσες ή νέες τεχνολογίες είναι αποτελεσματικές στην απομάκρυνση αντικών από τα απόβλητα; Ποιες πολιτικές παρεμβάσεις απαιτούνται σε εθνικό/ευρωπαϊκό επίπεδο για τον έλεγχο αυτών των ρύπων;)

Με την καθοδήγηση των παραπάνω στόχων, η εργασία προχωρά στην ανάλυση των διαδρομών ρύπανσης και παρουσίας των αντικών (Ενότητα IV), ακολούθως στις επιπτώσεις τους σε οικοσυστήματα, καλλιέργειες και υγεία (Ενότητα V), και τέλος παρουσιάζει τις διαθέσιμες τεχνολογικές λύσεις και προτάσεις πολιτικής (Ενότητα VI). Στη συνέχεια συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα (Ενότητα VII).

IV. ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΝΤΙΚΩΝ

Κύριες οδοί εισαγωγής αντικών στο περιβάλλον: Αφότου ένα αντικό φάρμακο καταναλωθεί από άνθρωπο (ή ζώο), μπορεί να ακολουθήσει διάφορες διαδρομές μέχρι να φτάσει στο φυσικό υδάτινο περιβάλλον (εικόνα 1). Οι σημαντικότερες πηγές και οδοί ρύπανσης συνοψίζονται ως εξής:

- **Αστικά & νοσοκομειακά λύματα:** Όπως προαναφέρθηκε, μεγάλο μέρος της δόσης ενός αντικού φαρμάκου, δεν μεταβολίζεται πλήρως και απεκκρίνεται αναλλοίωτο ή με τη μορφή δραστικών μεταβολιτών. Έτσι, ένα μεγάλο ποσοστό καταλήγει στα αστικά λύματα μέσω

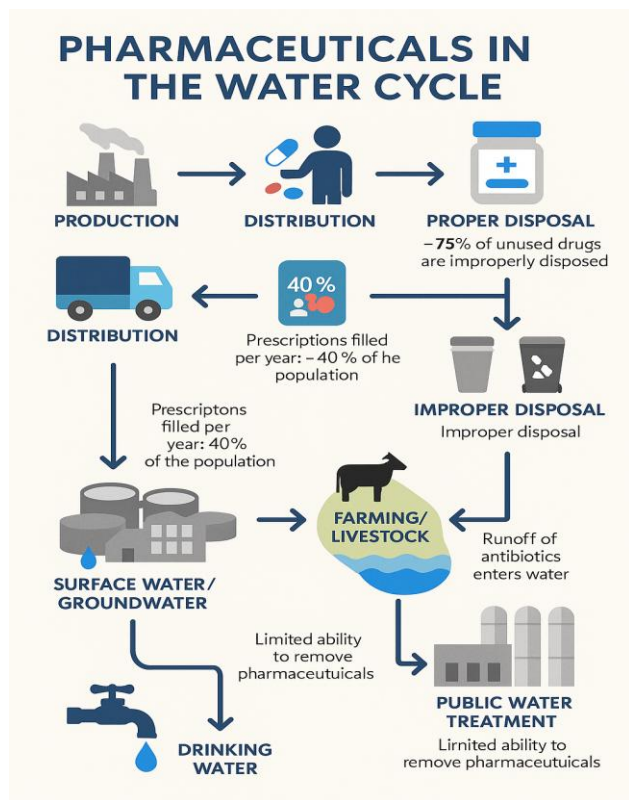
ούρων και κοπράνων. Τα λύματα αυτά περιλαμβάνουν και τα απόβλητα νοσοκομείων, όπου η χρήση αντικών (π.χ. σε κλινικές COVID-19 ή HIV) είναι υψηλή. Οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (ΜΕΛ) όμως δεν έχουν σχεδιαστεί για πλήρη απομάκρυνση τέτοιων μικρορυπαντών – οι συμβατικές βιολογικές διεργασίες και η καθίζηση συχνά αποτυγχάνουν να διασπάσουν επαρκώς πολλά αντικά. Ως αποτέλεσμα, ένα μέρος των αντικών παραμένει στις επεξεργασμένες εκροές των ΜΕΛ και εκβάλλει σε ποτάμια, λίμνες ή στη θάλασσα. Έχει παγκοσμίως τεκμηριωθεί η παρουσία αντικών στις εκροές. Για παράδειγμα, στην Ιαπωνία μετρήθηκαν έως 293 ng/L οσελταμιβίρης σε εκροές κατά την περίοδο έξαρσης γρίπης [4]. Συνεπώς, η ανεπαρκής επεξεργασία λυμάτων αποτελεί πρωταρχική οδό εισαγωγής αντικών ρύπων στα υδάτινα συστήματα.

- **Απόρριψη μη χρησιμοποιημένων φαρμάκων:** Η μη ορθή διάθεση ληγμένων ή αχρησιμοποίητων φαρμάκων συμβάλλει επίσης στη ρύπανση. Συχνά, χάπια/σιρόπια που περισσεύουν απορρίπτονται είτε στην/στο τουαλέτα/νεροχύτη, είτε στα οικιακά απορρίμματα. Αυτό οδηγεί σε άμεση είσοδο δραστικών ουσιών στο αποχετευτικό σύστημα ή στη δεύτερη περίπτωση, σε χώρους ταφής απορριμμάτων (χωματερές). Στις χωματερές, τα φάρμακα μπορεί να διαλυθούν στο διήθημα και να ρυπάνουν τα υπόγεια νερά. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA) [11], σημαντικό μερίδιο των εκπομπών φαρμακευτικών στο περιβάλλον προέρχεται – πέρα από τα λύματα – και από την απόρριψη φαρμάκων σε χωματερές και αποχετεύσεις. Η εκπαίδευση του κοινού για τη σωστή διαχείριση των οικιακών φαρμάκων και η ύπαρξη προγραμμάτων συλλογής ληγμένων φαρμάκων (π.χ. μέσω φαρμακείων) κρίνονται αναγκαίες για τον περιορισμό αυτής της οδού ρύπανσης.

- **Βιομηχανικές εκροές (φαρμακευτική βιομηχανία):** Οι μονάδες παραγωγής φαρμάκων αποτελούν σημειακές πηγές εισόδου δραστικών ουσιών στο περιβάλλον. Σε περιοχές με έντονη συγκέντρωση φαρμακοβιομηχανιών, έχουν καταγραφεί υψηλές τοπικές συγκεντρώσεις φαρμακευτικών ουσιών στα επιφανειακά νερά, αποδιδόμενες σε ανεπεξέργαστα ή πλημμελώς επεξεργασμένα βιομηχανικά απόβλητα. Για παράδειγμα, μελέτες στην Ινδία (μεγάλο παραγωγό γενόσημων φαρμάκων), δείχνουν επίπεδα συγκεντρώσεων αντιβιοτικών στα παρακείμενα ποτάμια της τάξης mg/L – εξαιρετικά υψηλές τιμές [10]. Αντίστοιχα, αντικά θα μπορούσαν να προέρχονται από εργοστάσια παραγωγής εάν δεν εφαρμόζονται βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων. Διεθνείς οργανισμοί (π.χ. UNEP) [5], [12] αναγνωρίζουν τις εκπομπές από τη φαρμακευτική βιομηχανία ως σημαντική πηγή ρύπανσης και υπογραμμίζουν την ανάγκη αυστηρών ελέγχων και θέσπισης ορίων στις βιομηχανικές εκροές.

- **Επαναχρησιμοποίηση νερού & γεωργικές πρακτικές:** Σε πολλές περιοχές (κυρίως άνυδρες), το επεξεργασμένο νερό λυμάτων επαναχρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών. Επίσης, η αφυδατωμένη ιλύς των ΜΕΛ (λυματολάσπη) χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό. Αυτές οι πρακτικές, αν και προάγουν την κυκλική οικονομία του νερού, δημιουργούν μια οδό μεταφοράς φαρμακευτικών υπολειμμάτων από τα

απόβλητα στο έδαφος και στα φυτά. Το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα του ΟΗΕ (UNEP) προειδοποιεί ότι όταν ζωικό λίπασμα ή επεξεργασμένη λάσπη με φαρμακευτικά κατάλοιπα χρησιμοποιείται για σκοπούς λίπανσης, οι δραστικές ουσίες μπορούν να ρυπάνουν το έδαφος και να βρεθούν τελικά εντός εδώδιμων καλλιεργειών. Παρομοίως, εάν το νερό άρδευσης προέρχεται από ανεπαρκώς επεξεργασμένα λύματα, μπορεί να περιέχει αντικά που προστίθενται στο χωράφι με κάθε πότισμα.



Εικόνα 1 Διαδρομή των φαρμάκων – συμπεριλαμβανομένων των αντικών – από την κατανάλωση και απόρριψη μέχρι την είσοδο στο περιβάλλον μέσω αποχετεύσεων και μονάδων επεξεργασίας λυμάτων (Ιδία επεξεργασία, 2025).

Παγκόσμια παρουσία αντικών ρύπων: Μελέτες από όλο τον κόσμο επιβεβαιώνουν ότι οι αντικές ενώσεις ανιχνεύονται ευρέως στο περιβάλλον. Σύμφωνα με πρόσφατες ανασκοπήσεις, τουλάχιστον 631 διαφορετικές φαρμακευτικές ουσίες (διάφορων κατηγοριών), έχουν βρεθεί πάνω από τα όρια ανίχνευσης σε περιβαλλοντικά δείγματα ύδατος, σε 71 χώρες παγκοσμίως.

Ειδικά για τα αντικά, στοιχεία από την Ευρώπη, την Αμερική και την Ασία, δείχνουν την παρουσία τους σε επεξεργασμένα λύματα, επιφανειακά ύδατα και υπόγεια νερά. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19 παρατηρήθηκε αύξηση 170% στα επίπεδα αντικών (π.χ. φαβιπιραβίρης, ρεμδεσιβίρης) στα λύματα της Αθήνας την άνοιξη του 2020 (πρώτο κύμα), συγκριτικά με τα προ πανδημίας επίπεδα [2]. Επιφανειακά νερά κοντά σε αστικά κέντρα έχουν παρουσιάσει συγκεντρώσεις αντικών δεκάδων ή εκατοντάδων ng/L, ιδίως κατά περιόδους εκτεταμένης χρήσης (εποχές ιώσεων, κ.λπ.). Η γεωγραφική διασπορά του προβλήματος υπογραμμίζει την ανάγκη διεθνών στρατηγικών: φαρμακευτικοί ρύποι

εντοπίζονται από την Ευρώπη και τη Β. Αμερική έως την Αφρική και την Ασία, με τις υψηλότερες συχνότητες/συγκεντρώσεις παρακολούθησης/ανίχνευσης σε Ευρώπη/Β. Αμερική και σημαντικά κενά δεδομένων σε περιοχές όπως η Αφρική. Ενδεικτικά, η Ευρώπη/Β. Αμερική αντιπροσωπεύει το ~75% των δημοσιευμένων μετρήσεων, ενώ για ολόκληρη την Αφρική μέχρι πρόσφατα υπήρχαν μόλις 23 δημοσιεύσεις με μετρήσεις φαρμάκων στο περιβάλλον. Παρά τις διαφορές αυτές, το πρόβλημα αναγνωρίζεται πια ως παγκόσμιο. Διεθνείς οργανισμοί (UNEP, WHO) έχουν αρχίσει να κινητοποιούνται, προτείνοντας κοινές δράσεις παρακολούθησης και μετριασμού (βλ. Ενότητα VI).

Διαδρομές ρύπανσης στις καλλιέργειες: Όπως αναφέρθηκε, η επαναχρησιμοποίηση νερού και ιλύος στην αγροτική παραγωγή δημιουργεί έναν μηχανισμό μεταφοράς φαρμάκων στο έδαφος και στα φυτά. Έχει πλέον τεκμηριωθεί ότι πολλά φυτά μπορούν να προσλάβουν και να συσσωρεύσουν φαρμακευτικές ουσίες από το έδαφος/νερό άρδευσης (Πίνακας 1).

Δραστική ουσία	Επεξεργασμένα λύματα (ng/L)	Φυτικός ιστός (ng/g φ.β.)	Πηγές
Λαμβουδίνη (3TC)	~1,500	~25 (φύλλα μαρουλιού)	[1], [13]
Οσελταμβίρη (OS/OC)	~200	5–10 (φύλλα μαρούλι/σπανάκι)	[7], [13]
Λοπιναβίρη (LPV)	34,000–38,000*	~50 (βρώσιμο μέρος φυτού)*	[14]
Αβακαβίρη (ABC)	έως ~980 (influent), ~1,320 (TPs effluent)**	—	[14]
Εμτρισταβίρη (FTC)	έως ~980 (influent)**	—	[15]
Ακυκλοβίρη (ACV)	400–1,360	—	[16]
Εφαβιρένζη (EFV)	10 ¹ –10 ³	έως ~3,463 (υδροπονία)***	[13]
Νεβιραπίνη (NVP)	10 ¹ –10 ³	TF>1, φύλλα > ρίζες***	[13]

Πίνακας 1 Ενδεικτικές μετρηθείσες συγκεντρώσεις αντικών φαρμάκων σε υγρά απόβλητα και φυτικούς ιστούς.

* Πολύ υψηλές, τιμές έχουν αναφερθεί έως 34,000 ng/L σε εκροές (effluents) WWTP στη Νότια Αφρική. Η τιμή 38,000 ng/L αναφέρεται σε μεμονωμένες μελέτες. Για τη συγκέντρωση 50 ng/g, το βρώσιμο μέρος στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν ρίζωμα αμυλούχου φυτού.

** Influent: εισερχόμενα λύματα σε εγκατάσταση επεξεργασίας (πριν την επεξεργασία). Effluent: εκροή επεξεργασμένων λυμάτων (μετά την επεξεργασία). Τα TPs (transformation products) είναι μεταβολίτες/παραγώγα που σχηματίζονται κατά την επεξεργασία.

*** Τα δεδομένα για EFV και NVP προέρχονται κυρίως από υδροπονικά πειράματα με υψηλές συγκεντρώσεις. Ο δείκτης TF (Translocation Factors) δείχνει τη μετακίνηση από ρίζες σε φύλλα. TF>1 σημαίνει υψηλότερη συγκέντρωση στα φύλλα σε σχέση με τις ρίζες.

Πειράματα σε θερμοκήπια και αγρούς δείχνουν ότι λαχανικά όπως σπανάκι, παντζάρι, ντομάτα, μπορούν να απορροφήσουν αντιρετροϊκά φάρμακα (αβακαβίρη, νεβιραπίνη, εφιβιρένζη), μέσω των ριζών, όταν καλλιεργούνται σε έδαφος αρδευόμενο με ρυπασμένο νερό [9], [10]. Οι ουσίες μεταφέρονται στο εσωτερικό των φυτών και εντοπίζονται τόσο σε βλαστούς/φύλλα, όσο και στους καρπούς. Για παράδειγμα, σε αρδευόμενο σπανάκι με νερό το οποίο περιείχε αντικά, βρέθηκε αβακαβίρη ~40

mg/kg στις ρίζες, ενώ η εφαιβιρένζη ανιχνεύθηκε στα φύλλα ντομάτας σε επίπεδα ~35 mg/kg. Αν και αυτές οι τιμές είναι χαμηλές σε απόλυτο μέγεθος (ppm-ppb), η παρουσία τους σε εδάφιμα μέρη φυτών είναι ανησυχητική, διότι σημαίνει ότι μέσω της τροφικής αλυσίδας μικρές ποσότητες αντικών μπορεί να καταναλωθούν ακούσια από τον άνθρωπο. Επίσης, υπάρχει ο προβληματισμός ότι η μακροχρόνια άρδευση με νερό που περιέχει μείγμα φαρμακευτικών υπολειμμάτων ίσως έχει αρνητικές επιπτώσεις στη φυτική ανάπτυξη ή στη μικροβιακή κοινότητα του εδάφους, επηρεάζοντας έτσι την υγεία των καλλιεργειών. Οι ειδικοί συνιστούν την τακτική αξιολόγηση της ποιότητας του νερού άρδευσης – το ρυπασμένο με αντικά νερό οδηγεί σε πρόσληψή τους από τα φυτά και σε ρύπανση των γεωργικών προϊόντων. Συνολικά, οι πρακτικές γεωργικής επαναχρησιμοποίησης απαιτούν προσοχή και περαιτέρω έρευνα, ώστε να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη (εξοικονόμηση νερού, θρεπτικών), χωρίς να υπονομευτεί η ασφάλεια της αγροτικής παραγωγής.

V. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Επιπτώσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα: Τα αντικά φάρμακα, αν και σχεδιάστηκαν για να δρουν σε ιούς-στόχους σε ανθρώπους και ζώα, μπορούν να επηρεάσουν οργανισμούς μη-στόχους στο περιβάλλον. Μια πληθώρα οργανισμών – από μικροάλλα και πλαγκτόν έως ψάρια, αμφίβια και πτηνά – επηρεάζονται δυνητικά από την παρουσία αντικών στα νερά. Ακόμα και χαμηλές συγκεντρώσεις (ng/L–μg/L) ενδέχεται να επηρεάσουν τη συμπεριφορά, την ανάπτυξη ή την αναπαραγωγή ευαίσθητων ειδών. Ειδικά για τα αντικά, οι μελέτες είναι ακόμα περιορισμένες, αλλά υπάρχει ανησυχία ότι μπορούν να διαταράξουν οικολογικές διεργασίες όπως οι μικροβιακές κοινότητες νερού ή το φυτοπλαγκτόν. Για παράδειγμα, η εφαιβιρένζη (αντιρετροϊκό) βρέθηκε ότι επηρεάζει δυσμενώς πληθυσμούς φυτοπλαγκτού σε εργαστηριακές συνθήκες [17]. Συνολικά, επειδή τα αντικά είναι χημικά σταθερά, υδρόφιλα και συχνά βιοανθεκτικά, συσσωρεύονται ως επίμονοι οργανικοί ρύποι στο περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να επιφέρουν χρόνιες πιέσεις στα οικοσυστήματα, έστω και σε μικροδόσεις [18].

Ανάδυση ανθεκτικών ιών: Ένα κρίσιμο ζήτημα δημόσιας υγείας είναι η πιθανότητα ανάπτυξης αντοχής των ιών στα φάρμακα λόγω της περιβαλλοντικής έκθεσης. Η έννοια αυτή είναι ανάλογη με την μικροβιακή αντοχή στα αντιβιοτικά: όπως τα “υπερβακτήρια” εμφανίζονται σε περιβαλλοντικές δεξαμενές υπό χρόνια έκθεση σε αντιβιοτικά, έτσι και οι ιοί μπορεί να αναπτύξουν μεταλλάξεις ανθεκτικότητας όταν εκτίθενται σε αντικά στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, έχει αποδειχθεί ότι στελέχη γρίπης ανθεκτικά στο Tamiflu (οσελταμίβηρη) θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε πληθυσμούς υδρόβιων πτηνών και να συμβάλλουν στη δημιουργία νέου πανδημικού στελέχους ανθεκτικού στα υπάρχοντα φάρμακα. Παρομοίως, για τον SARS-CoV-2 (ιός COVID-19) έχει τεθεί το ερώτημα κατά πόσον η μαζική χρήση αντικών (π.χ. ρεμδεσιβίρης) μπορεί να οδηγήσει σε

ανθεκτικούς ιούς σε δεξαμενές ζώων (π.χ. νυχτερίδες) [8]. Επειδή τέτοια ανθεκτικά στελέχη θα μπορούσαν αργότερα να μεταδοθούν ξανά στον άνθρωπο, η μελέτη αυτών των μηχανισμών και η παρακολούθηση τυχόν “περιβαλλοντικών μεταλλάξεων” των ιών έχει ζωτική σημασία για τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας των αντικών θεραπειών στο μέλλον. Εν κατακλείδι, το περιβάλλον λειτουργεί ως μια δεξαμενή ιών, όπου η συνεχής παρουσία φαρμάκων μπορεί να ασκεί εξελικτική πίεση υπέρ της αντοχής.

Επιπτώσεις στις καλλιέργειες και στη φυτική υγεία:

Η παρουσία φαρμακευτικών ουσιών στο έδαφος και το νερό άρδευσης μπορεί να έχει επιπτώσεις και στα ίδια τα φυτά. Πέρα από τη βιοσυσσώρευση στα εδάφιμα μέρη (που αποτελεί κίνδυνο για τους καταναλωτές), υπάρχουν ενδείξεις για φυτοτοξικές επιδράσεις ορισμένων φαρμάκων. Για παράδειγμα, εργαστηριακές μελέτες έδειξαν ότι η λαμβουδίνη (αντιικό για HIV) μπορεί να προκαλέσει σημαντική θνησιμότητα σε υδρόβιους οργανισμούς-δείκτες όπως η Δάφνια (100% θάνατο σε έκθεση 100 μg/L), αλλά και να αναστείλει την ανάπτυξη φυτών – παρατηρήθηκε μείωση του ριζικού μήκους κρεμμυδιού σε παρόμοιες συγκεντρώσεις [17]. Συνολικά, η παρουσία αντικών στο περιβάλλον, όπως η λαμβουδίνη, εκτιμήθηκε ότι συνεπάγεται οικολογικό κίνδυνο για πληθώρα οργανισμών σε επίπεδα συγκέντρωσης που ήδη έχουν ανιχνευθεί σε επιφανειακά ύδατα. Ακόμη, έχει τεκμηριωθεί ότι ακόμα και πολύ μικρές συγκεντρώσεις (ng/L) ορισμένων αντικών μπορούν να διαταράξουν τις μικροβιακές κοινότητες του νερού (επηρεάζοντας βακτήρια και μικροφύκη). Τέτοιες αλλοιώσεις ενδέχεται να επηρεάζουν τους βιογεωχημικούς κύκλους και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων (π.χ. τον κύκλο των θρεπτικών στο έδαφος ή την ισορροπία της μικροχλωρίδας στη ριζόσφαιρα). Επιπλέον, όπως συζητήθηκε, ένας πιθανός κίνδυνος είναι η ανάπτυξη ανθεκτικότητας: η διαρκής έκθεση ιών και μικροβίων σε υπο-θανατηφόρες συγκεντρώσεις αντικών στο περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει σε εξελικτική πίεση για ανθεκτικά στελέχη, ανάλογη με το φαινόμενο της μικροβιακής αντοχής στα αντιβιοτικά.

Έμμεση ανθρώπινη έκθεση – δημόσια υγεία: Όσον αφορά τον άνθρωπο, τα ίχνη αντικών στο πόσιμο νερό και στα τρόφιμα τυπικά εντοπίζονται σε εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις (επίπεδα δισεκατομμυριοστών του γραμμαρίου ανά λίτρο στο νερό). Θεωρείται απίθανο αυτές οι μικρο-δόσεις να προκαλούν άμεσες οξείες φαρμακολογικές δράσεις (δηλαδή, είναι πολύ κάτω από θεραπευτικές δόσεις). Ωστόσο, υπάρχει αβεβαιότητα για τις μακροχρόνιες επιπτώσεις της συνεχούς, χαμηλής έκθεσης σε μείγμα φαρμάκων (κοκτέιλ μικροσυγκεντρώσεων). Παραμένουν σημαντικά κενά γνώσης σχετικά με το εάν η χρόνια κατανάλωση λαχανικών ή νερού που περιέχουν τέτοια κατάλοιπα μπορεί μακροπρόθεσμα να έχει υποτοξικές επιδράσεις στον άνθρωπο. Πιθανοί κίνδυνοι που έχουν υποτεθεί περιλαμβάνουν: (α) επίδραση στο ανθρώπινο μικροβίωμα – π.χ. τα αντικά θα μπορούσαν θεωρητικά να επηρεάσουν την ισορροπία των ωφέλιμων ιών ή βακτηρίων στο σώμα, και (β) αλληλεπίδραση με φάρμακα που τυχόν λαμβάνει ένας άνθρωπος (π.χ. ένα άτομο που λαμβάνει ήδη φάρμακα

μπορεί να εκτεθεί επιπλέον σε ίχνη άλλων αντιικών μέσω του νερού/τροφής, με άγνωστη συνέργεια). Τέτοια σενάρια δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς. Σύμφωνα με την αρχή της προφύλαξης, ακόμα και χωρίς αποδείξεις άμεσων κινδύνων, η επιστημονική κοινότητα και οι αρχές οφείλουν να παρακολουθούν στενά το ζήτημα και να λαμβάνουν προληπτικά μέτρα όπου χρειάζεται. Για παράδειγμα, η ενημέρωση των επαγγελματιών υγείας και των καταναλωτών ώστε να αποφεύγεται η άσκοπη χρήση φαρμάκων, και η προώθηση της ορθής διάθεσης των φαρμακευτικών αποβλήτων, αποτελούν απλά αλλά σημαντικά βήματα για τη μείωση της ανθρώπινης έκθεσης σε φαρμακευτικούς ρύπους.

VI. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Αποδοτικότητα συμβατικών ΜΕΛ και ανάγκη αναβάθμισης: Όπως αναφέρθηκε, οι τυπικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία και απολύμανση) μειώνουν εν μέρει τις συγκεντρώσεις φαρμάκων, αλλά σπάνια επιτυγχάνουν πλήρη απομάκρυνσή τους [5], [6]. Έτσι, σημαντικές ποσότητες αντιικών “διαφεύγουν” στην τελική εκροή και καταλήγουν στους υδάτινους αποδέκτες. Το πρόβλημα επιτείνεται από την έλλειψη εξειδικευμένων περιβαλλοντικών ορίων: σήμερα ούτε η ΕΕ ούτε οι ΗΠΑ έχουν θεσπίσει νομικά όρια συγκέντρωσης για φαρμακευτικά υπολείμματα στο νερό (πόσιμο ή αρδευτικό). Μόνο πρόσφατα, η ΕΕ μέσω οδηγιών (όπως η Στρατηγική για τα Φαρμακευτικά στο Περιβάλλον) αναγνωρίζει την ανάγκη ελέγχου αυτών των ουσιών, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν κενά στην εφαρμογή. Για παράδειγμα, η νέα ευρωπαϊκή νομοθεσία για την επαναχρησιμοποίηση νερού άρδευσης (Κανονισμός ΕΕ 2020/741) θέτει μικροβιακά κριτήρια ασφάλειας, αλλά δεν περιλαμβάνει ακόμη υποχρεωτικά όρια για μικρορυπαντές όπως τα αντιικά. Αυτό το ρυθμιστικό έλλειμμα σημαίνει ότι δεν ασκείται πίεση για βελτιώσεις στις τεχνολογίες επεξεργασίας και δεν υπάρχει συστηματική παρακολούθηση των αντιικών στο ανακυκλωμένο νερό [2], [3].

Είναι σαφές λοιπόν ότι απαιτείται υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας για την αποτελεσματική απομάκρυνση των αντιικών φαρμάκων από τα λύματα. Τα τελευταία χρόνια, έχουν εξεταστεί διάφορες προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας, με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ενδεικτικές τεχνολογίες:

- **Οζόνωση (O_3)** : Το όζον ως ισχυρό οξειδωτικό μπορεί να διασπάσει πολλά οργανικά μόρια. Πιλοτικές εφαρμογές σε μονάδες δείχνουν >80% μείωση πληθώρας μικρορυπαντών με οζόνωση [4], [19]. Για παράδειγμα, μελέτες [5] σύγκριναν απευθείας την οζόνωση με άλλες μεθόδους και βρήκαν ότι έχει εξαιρετική απόδοση σε ουσίες με “όζον-αντιδρώσες” ομάδες, ενώ για ουσίες χωρίς τέτοιες ομάδες η απόδοση της ήταν μικρότερη αλλά πάντως σημαντική. Συνολικά, η οζόνωση θεωρείται πλέον ώριμη τεχνολογία και εφαρμόζεται ήδη σε κάποιες χώρες (βλ. παράδειγμα Ελβετίας παρακάτω).

- **Προηγμένες Διεργασίες Οξείδωσης (AOPs)**: Συνδυασμοί οξειδωτικών (π.χ. υπεροξείδιο του υδρογόνου

H_2O_2) με UV ακτινοβολία ή καταλύτες παράγουν ρίζες υδροξυλίου ($\bullet OH$), οι οποίες είναι εξαιρετικά δραστικές και οξειδώνουν πλήρως τους οργανικούς ρύπους. Τέτοιες διεργασίες (UV/ H_2O_2 , φωτοκαταλυτική οξείδωση με TiO_2 , αντιδράσεις Fenton, κ.ά.) έχουν δείξει πολύ υψηλή αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση φαρμακευτικών ουσιών, συχνά άνω του 90% [4]. Πλεονέκτημά τους είναι η πλήρης ανοργανοποίηση/ορυκτοποίηση των ρύπων (μετατροπή σε CO_2 και H_2O), όμως έχουν μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος. Εξετάζεται η εφαρμογή τους κυρίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται άριστη ποιότητα εκροής (π.χ. για παραγωγή πόσιμου νερού από ανακυκλωμένο).

- **Προσρόφηση σε Ενεργό Άνθρακα (GAC/PAC)**: Ο ενεργός άνθρακας – είτε σε κοκκώδη (GAC) είτε σε κονιοποιημένη μορφή (PAC) – χρησιμοποιείται ήδη ευρέως για την απομάκρυνση οργανικών ρύπων σε νερό. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός για σχετικά μη-πολωμένα μόρια. Στις μονάδες, μπορεί να προστεθεί ως επιπλέον στάδιο φίλτρανης [2], [12]. Μελέτες δείχνουν επίσης >80% απομάκρυνση πολλών φαρμακευτικών ενώσεων με χρήση ενεργού άνθρακα. Ο άνθρακας έχει όμως πεπερασμένη ικανότητα – απαιτεί αναγέννηση ή αντικατάσταση όταν κορεστεί.

- **Μεμβρανικές Τεχνολογίες**: Οι μεμβρανικοί βιοαντιδραστήρες (MBR), που συνδυάζουν βιολογική επεξεργασία με διήθηση μέσω μεμβράνης (υπερδιήθηση ή νανοδιήθηση), μπορούν να συγκρατήσουν καλύτερα τα μικρομόρια και έχουν συχνά ανώτερη απόδοση από τις συμβατικές δεξαμενές καθίζησης. Επιπλέον, με την αντίστροφη όσμωση (RO), επιτυγχάνεται σχεδόν πλήρης απομάκρυνση διαλυμένων ουσιών, όμως με υψηλό ενεργειακό κόστος και παραγωγή συμπυκνωμάτων που χρειάζονται περαιτέρω διαχείριση [12]. Οι μεμβράνες θεωρούνται απαραίτητες σε περιπτώσεις όπου απαιτείται νερό πολύ υψηλής καθαρότητας (π.χ. έμμεσο πόσιμο από ανακυκλωμένα λύματα), ωστόσο το κόστος τους πρέπει να σταθμίζεται.

- **Βιολογικές και υβριδικές λύσεις**: Πρόσφατα κερδίζουν έδαφος πιο “φιλικές” λύσεις, όπως οι βιοαντιδραστήρες με μικροφύκη [20]. Τα μικροάλλα σε κατάλληλες δεξαμενές μπορούν να αποδομούν ή/και να συσσωρεύουν ορισμένους ρύπους, μετατρέποντας ταυτόχρονα τα απόβλητα σε χρήσιμη βιομάζα (π.χ. για βιοκαύσιμα). Αυτές οι λύσεις ευθυγραμμίζονται με την κυκλική οικονομία. Αν και είναι πολλά υποσχόμενες, η εφαρμογή τους σε μεγάλη κλίμακα αντιμετωπίζει προκλήσεις (απαιτήσεις χώρου, σταθερότητας διεργασίας, κ.λπ.). Εντούτοις, έρευνες συνεχίζονται για εντοπισμό μικροοργανισμών/ενζύμων που διασπούν συγκεκριμένα φάρμακα (βιοαποκατάσταση).

Σε χώρες όπως η Ελβετία, έχει ήδη γίνει νομοθετική ρύθμιση προς αυτή την κατεύθυνση: από το 2016 θεσπίστηκε νόμος που απαιτεί την αναβάθμιση ~120 μεγάλων ΜΕΛ με τεχνολογίες 4^{ου} σταδίου (όζον, ενεργός άνθρακας) για την απομάκρυνση >80% των μικρορυπαντών στις εκροές [6]. Η χρηματοδότηση γίνεται μέσω ειδικού τέλους (~9 ελβετικά φράγκα ανά κάτοικο/έτος) που καλύπτει ~75% του κόστους αναβάθμισης. Ήδη οι πρώτες αναβαθμισμένες μονάδες επιτυγχάνουν >80% απομάκρυνση φαρμακευτικών ουσιών στις εκροές με χρήση ενεργού άνθρακα. Αυτό το παράδειγμα επιβεβαιώνει την τεχνική εφικτότητα και

επηρεάζει και τη συζήτηση στην ΕΕ για παρόμοιες απαιτήσεις.

Προτάσεις ρυθμιστικών πλαισίων και πολιτικών: Η αποτελεσματική διαχείριση του προβλήματος απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικών και πολιτικών μέτρων. Προτείνονται τα εξής:

- **Θέσπιση ορίων και κανονισμών:** Είναι απαραίτητο να καθοριστούν όρια ανώτατων συγκεντρώσεων για επιλεγμένα αντικά φάρμακα στο πόσιμο νερό, στο αρδευτικό νερό και σε τρόφιμα (κατά τα πρότυπα των “προτύπων ποιότητας” που ισχύουν για άλλους ρύπους). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θα μπορούσε να επεκτείνει τη λίστα παρακολούθησης της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα Νερά ώστε να συμπεριλάβει αντικά, ως πρώτο βήμα για τον μελλοντικό καθορισμό ορίων. Επίσης, οποιαδήποτε επαναξιολόγηση των κανονισμών επαναχρησιμοποίησης νερού θα πρέπει να συμπεριλάβει δείκτες μικρορυπαντών. Σημειώνεται ότι η ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων στη φαρμακευτική νομοθεσία βρίσκεται σε εξέλιξη: σχετικά πρόσφατες προτάσεις (2023) στην ΕΕ θα επιτρέπουν στις ρυθμιστικές αρχές να αρνούνται έγκριση νέου φαρμάκου αν ο περιβαλλοντικός κίνδυνος θεωρηθεί απαράδεκτος. Αυτό αποτελεί μια σημαντική αλλαγή στη φαρμακευτική νομοθεσία, με στόχο να συμβάλλει στην παρασκευή πιο “πράσινων” φαρμάκων.

- **Αναβάθμιση υποδομών και χρηματοδότηση:** Οι χώρες θα πρέπει να προτεραιοποιήσουν τεχνολογικές αναβαθμίσεις σε κρίσιμες μονάδες ύδρευσης/αποχέτευσης (ιδίως σε μεγάλες πόλεις ή περιοχές με έντονη ανακύκλωση νερού). Η αξιοποίηση εθνικών ή ευρωπαϊκών πόρων (π.χ. Ταμείο Ανάκαμψης) για συγχρηματοδότηση έργων “τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας” θα επιταχύνει την υλοποίηση. Η εμπειρία της Ελβετίας δείχνει ότι ένα μικρό τέλος ανά πολίτη μπορεί να καλύψει μεγάλο μέρος του κόστους, αν υπάρχει πολιτική βούληση και αποδοχή.

- **Διευρυμένη Ευθύνη Παραγωγού (EPR):** Μια πολιτική προσέγγιση που συζητείται είναι η επιβολή ευθύνης στους παραγωγούς φαρμάκων για το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει εισφορά των φαρμακευτικών εταιρειών σε ένα ταμείο που χρηματοδοτεί την αναβάθμιση ΜΕΛ ή προγράμματα συλλογής φαρμάκων. Ήδη, στο πλαίσιο της αρχής “ο ρυπαίνων πληρώνει”, η ΕΕ μελετά την εφαρμογή EPR για τα φαρμακευτικά προϊόντα – όπως υπάρχει σε άλλους τομείς (μπαταρίες, συσκευασίες). Αυτό θα κινητοποιήσει τις εταιρείες να σχεδιάζουν φάρμακα με μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και να συμβάλλουν στην αντιμετώπιση του προβλήματος.

- **Προγράμματα συλλογής & ευαισθητοποίηση:** Σε εθνικό επίπεδο, η υποχρεωτική εφαρμογή προγραμμάτων συλλογής οικιακών φαρμάκων (μέσω φαρμακείων, δήμων, κ.λπ.) συνοδευόμενη από καμπάνιες ενημέρωσης των πολιτών είναι κρίσιμη. Μελέτες δείχνουν ότι όταν εφαρμόζονται καλά σχεδιασμένες εκστρατείες, οι πολίτες ανταποκρίνονται. Προτείνεται νομοθετική υποχρέωση για τα φαρμακεία να δέχονται δωρεάν όλα τα ληγμένα/αχρείαστα φάρμακα προς ασφαλή απόσυρση, καθώς και απλές παρεμβάσεις όπως ετικέτες στις συσκευασίες που υπενθυμίζουν “Επιστρέψτε τα μη χρησιμοποιημένα φάρμακα στο φαρμακείο”. Παράλληλα,

εκπαίδευση επαγγελματιών υγείας και αγροτών: Οι γιατροί και κτηνίατροι μπορούν να βοηθήσουν περιορίζοντας την άσκοπη συνταγογράφηση αντικών (όπως και άλλων φαρμάκων), ενώ οι αγρότες πρέπει να ενημερωθούν για βέλτιστες πρακτικές άρδευσης με ανακυκλωμένο νερό (π.χ. χρήση κατάλληλων φίλτρων, αποφυγή κατάκλισης φύλλων).

- **Διεθνής συνεργασία:** Το πρόβλημα είναι παγκόσμιο, γι’ αυτό χρειάζεται διεθνής συντονισμός. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει ήδη εντάξει τη διαχείριση των φαρμακευτικών αποβλήτων στα σχέδια δράσης για την αντιμετώπιση της μικροβιακής αντοχής (AMR). Η UNEP προωθεί την εφαρμογή της αρχής της προφύλαξης και περαιτέρω έρευνας/παρακολούθησης. Σε επίπεδο ΕΕ, το 2022 προτάθηκε η ένταξη ορισμένων δραστικών φαρμακευτικών ουσιών στη λίστα προτεραιότητας της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά, που θα επιτρέψει τη νομική θέσπιση ορίων συγκεντρώσεως και τακτική παρακολούθησή τους. Επιπλέον, ένα ευρωπαϊκό στρατηγικό σχέδιο για τα φαρμακευτικά στο περιβάλλον θα μπορούσε να ενσωματωθεί στη νομοθεσία για το νερό και τα απόβλητα.

Συνοψίζοντας, απαιτείται ένας συνδυασμός τεχνολογικών, ρυθμιστικών και κοινωνικών παρεμβάσεων για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των αντικών ως περιβαλλοντικών ρυπαντών. Η προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας απέναντι σε αυτούς τους “νέους” ρύπους προϋποθέτει μια ολοκληρωμένη στρατηγική όπου τεχνολογία, πολιτική και κοινωνία λειτουργούν συμπληρωματικά.

VII. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι τα αντικά φάρμακα συνιστούν υπαρκτό και ανησυχητικό ρύπο στο περιβάλλον, με πολυεπίπεδες επιπτώσεις. Πρώτον, επιβεβαιώνεται η παρουσία αντικών δραστικών ουσιών σε γεωργικές καλλιέργειες που εκτίθενται σε ρυπασμένα ύδατα. Μέσω της άρδευσης με ανεπαρκώς επεξεργασμένο νερό ή της εφαρμογής λυματολάσπης στα εδάφη, φαρμακευτικά υπολείμματα μπορούν να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα [9], [10]. Πρόσφατες μελέτες εντοπίζουν αντιρετροϊκά και άλλα αντικά σε λαχανικά και δημητριακά, γεγονός που εγείρει ερωτήματα σχετικά με την ασφάλεια των τροφίμων και επιβεβαιώνει ότι οι πρακτικές γεωργικής επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων χρειάζονται προσεκτική διαχείριση. Η βιοσυσσώρευση αυτή, αν και σε χαμηλά επίπεδα, σημαίνει ότι ο άνθρωπος μπορεί να εκτίθεται χρόνια σε ίχνη αντικών μέσω της διατροφής – κάτι που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης ως προς τις πιθανές υποχρόνιες επιδράσεις στην υγεία.

Δεύτερον, οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι από την παρουσία αντικών στα οικοσυστήματα είναι υπαρκτοί. Τα αντικά, όντας βιοδραστικά μόρια σχεδιασμένα να επιδρούν σε συγκεκριμένους στόχους, μπορούν να επηρεάσουν οργανισμούς μη-στόχους. Για παράδειγμα, αναφέρθηκε ότι το αντικό λαμβουδίνη προκαλεί υψηλή θνησιμότητα σε υδρόβια μικρόβια-δείκτες (100% θάνατος σε Δάφνιες σε πειραματική έκθεση 100 µg/L) και αναστέλλει την ανάπτυξη φυτών (μείωση ριζικού μήκους κρεμμυδιών στην ίδια τάξη μεγέθους) [4], [10]. Συνολικά,

η παρουσία φαρμάκων όπως η λαμβουδίνη στο περιβάλλον εκτιμάται ότι εγκυμονεί οικολογικό κίνδυνο για πολλούς οργανισμούς σε συγκεντρώσεις της τάξης αυτών που έχουν ήδη ανιχνευθεί στα επιφανειακά ύδατα. Επιπλέον, ακόμα και νανοσυγκεντρώσεις ορισμένων αντικών μπορεί να έχουν δυσμενείς επιδράσεις στους υδρόβιους μικροοργανισμούς και στη σύνθεση των μικροβιακών κοινοτήτων. Τέτοιες διαταραχές ενδέχεται να επιφέρουν δευτερογενείς επιπτώσεις στους βιογεωχημικούς κύκλους. Επίσης, επιβεβαιώθηκε και πάλι ότι η περιβαλλοντική παρουσία αντικών μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη ανθεκτικότητας: η διαρκής έκθεση ιών και μικροβίων σε υπο-θανατηφόρες δόσεις ασκεί εξελικτική πίεση όμοια με αυτή των αντιβιοτικών, υποδηλώνοντας ότι το περιβάλλον λειτουργεί ως δεξαμενή ανθεκτικών στελεχών [7], [8].

Τρίτον, κατέστη σαφές ότι οι τρέχουσες πρακτικές επεξεργασίας λυμάτων είναι ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση των αντικών ρύπων. Οι συμβατικές ΜΕΛ, που επικεντρώνονται κυρίως στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών, δεν κατορθώνουν να αφαιρέσουν πλήρως τα φαρμακευτικά υπολείμματα. Έτσι, σημαντικές ποσότητες αντικών διαφεύγουν στην τελική εκροή και από εκεί στους υδάτινους αποδέκτες. Ακόμα και προηγμένες εγκαταστάσεις με επιπλέον στάδια (τριτοβάθμια επεξεργασία) μειώνουν εν μέρει τις συγκεντρώσεις, αλλά σπάνια τις εκμηδενίζουν. Το πρόβλημα διογκώνεται από την έλλειψη συγκεκριμένων ορίων – ούτε σε ευρωπαϊκό ούτε σε διεθνές επίπεδο έχουν θεσπιστεί αυστηρά όρια για τα περισσότερα φαρμακευτικά κατάλοιπα στο νερό. Μόλις πρόσφατα η ΕΕ αναγνώρισε την ανάγκη ελέγχου αυτών των ουσιών (με στρατηγικές, λίστες παρακολούθησης, κ.λπ.), αλλά παραμένουν κενά στην εφαρμογή. Για παράδειγμα, η νέα ευρωπαϊκή ρύθμιση για την επαναχρησιμοποίηση ύδατος στην άρδευση θέτει μόνο μικροβιακά κριτήρια και όχι όρια για μικρορυπαντές όπως τα αντικά.

Τέταρτον, διαφαίνεται ξεκάθαρα η ανάγκη υιοθέτησης προηγμένων τεχνολογιών για την αποτελεσματική απομάκρυνση των αντικών φαρμάκων από τα απόβλητα. Τεχνολογίες όπως η οζόνωση, οι προηγμένες διεργασίες οξειδωσης (UV/H_2O_2), η προσρόφηση σε νανοϋλικά ή ενεργό άνθρακα, και οι μεμβρανικές μέθοδοι (υπερδιήθηση, αντίστροφη όσμωση) έχουν δείξει σημαντικά υψηλότερη αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση φαρμακευτικών μικρορυπαντών συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους [4], [6], [20]. Επιπλέον, βιολογικές λύσεις όπως οι αντιδραστικές με μικροάλγη, αναπτύσσονται και μπορούν να συνεισφέρουν στην αποδόμηση των ρύπων, αξιοποιώντας παράλληλα την παραγόμενη βιομάζα (π.χ. για βιοενέργεια) [20]. Παρότι κάθε τεχνολογία έχει προκλήσεις (κόστος, ενέργεια, διαχείριση παραπροϊόντων), είναι φανερό ότι χωρίς την αξιοποίησή τους, η πλήρης αντιμετώπιση του προβλήματος δεν είναι εφικτή.

Τέλος, τονίζεται ότι η λύση πρέπει να είναι ολιστική: συνδυάζοντας τεχνολογικές, ρυθμιστικές και κοινωνικές παρεμβάσεις. Προτείνονται συγκεκριμένα μέτρα όπως η ενίσχυση της επεξεργασίας λυμάτων με τεταρτοβάθμιο στάδιο επεξεργασίας, η θέσπιση ορίων για αντικά στο νερό και τα τρόφιμα, η ασφαλής επαναχρησιμοποίηση πόρων (νερού, ιλύος) με ελαχιστοποίηση του κινδύνου, η συνέχιση της έρευνας και η παρακολούθηση των αντικών

στο περιβάλλον, καθώς και η εκπαίδευση/ευαισθητοποίηση όλων των εμπλεκόμενων (πολίτες, γιατροί, αγρότες). Μόνο μέσω συντονισμένων ενεργειών σε όλα τα επίπεδα – τεχνικό, θεσμικό, κοινωνικό – θα μπορέσει να διασφαλιστεί ότι η αυξανόμενη χρήση αντικών φαρμάκων δεν θα εξελιχθεί σε μείζονα απειλή για τα οικοσυστήματα και τη δημόσια υγεία.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] R. Wang, J. Luo, C. Li, J. Chen και N. Zhu, «Antiviral drugs in wastewater are on the rise as emerging contaminants: A comprehensive review of spatiotemporal characteristics, removal technologies and environmental risks,» *Journal of Hazardous Materials*, 1 June 2023.
- [2] A. Galani, N. Alygizakis, A. Reza, N. Thomaidis, e. Kastritis και M. Dimopoulos, «Patterns of pharmaceuticals use during the first wave of COVID-19 pandemic in Athens, Greece as revealed by wastewater-based epidemiology,» *The Science of The Total Environment*, December 2021.
- [3] M. Patel, R. Kumar, K. Kishor, T. Mlsna, C. Pittman και D. Mohan, «Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods,» *Chemical Reviews*, 4 March 2019.
- [4] B. Eryildiz, H. Ozgun, M. E. Ersahin και I. Koyuncu, «Antiviral drugs against influenza: Treatment methods, environmental risk assessment and analytical determination,» *Journal of Environmental Management*, 29 June 2022.
- [5] P. Kokkinos, J. Comia, S. Caucci, H. Hettiarachchi, F. Ballesteros, G. Oron, M. Salgot και I. Kalavrouziotis, «Wastewater and sludge reuse: selected case studies across the globe,» *Desalination and Water Treatment*, 24 July 2024.
- [6] P. Kokkinos, G. Mandilara, A. Nikolaidou, A. Velegraki, P. Theodoratos, D. Kampa, A. Blougoura, A. Christopoulou, E. Smeti, G. Kamizoulis, A. Vantarakis και A. Mavridou, «Performance of three small-scale wastewater treatment plants. A challenge for possible re use,» *Environmental Science and Pollution Research*, 30 June 2015.
- [7] A. C. Singer, J. D. Järhult, R. Grabic, G. A. Khan, R. H. Lindberg, G. Fedorova, J. Fick, M. J. Bowes, B. Olsen και H. Söderström, «Intra- and Inter-Pandemic Variations of Antiviral, Antibiotics and Decongestants in Wastewater Treatment Plants and Receiving Rivers,» *PLOS One*, 25 September 2014.
- [8] M. Kumar, K. Kuroda, A. Thakur, S. Mohapatra, K. Dhangar, K. Taki, S. Mukherjee, P. Mzumber, A. Patel, C. Sonne, P. Battacharya, P. Mohapatra, J. Rinklebe, M. Kitajima, F. Hai, M. Kumar και M. Kumar, «A chronicle of SARS-CoV-2: Seasonality, environmental fate, transport, inactivation, and antiviral drug resistance,» *Journal of Hazardous Materials*, 5 March 2021.
- [9] P. Kunene, και P. Mahlambi, «Case study on antiretroviral drugs uptake from soil irrigated with contaminated water: Bio-accumulation and bio-translocation to roots, stem, leaves, and fruits,» *Environmental Pollution*, 2 January 2023.
- [10] N. Mlunguza, S. Ncube, N. Mahlambi, L. Chimuka και L. Madikizela, «Determination of selected antiretroviral drugs in wastewater, surface water and aquatic plants using hollow fibre liquid phase microextraction and liquid chromatography - tandem mass spectrometry,» *Journal of Hazardous Materials*, 15 January 2020.
- [11] E. Chacca, I. Maldonado και F. Vilca, «Environmental and ecotoxicological effects of drugs used for the treatment of COVID 19,» *Water and Wastewater Management*, 10 August 2022.
- [12] S. Khalid, M. Shahid, I. Bibi, T. Sarwar, A. Shah και N. Niazi, «A Review of Environmental Contamination and Health Risk Assessment of Wastewater Use for Crop Irrigation with a Focus on Low and High-Income Countries,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1 May 2018.
- [13] P. Akenga, A. Gachanja, M. Fitzsimons, A. Tappina και S. Comber, «Uptake, accumulation and impact of antiretroviral and antiviral pharmaceutical compounds in lettuce,» *Science of The Total*

Environment, 24 December 2020.

- [14] O. Abafe, J. Spath, J. Fick, S. Jansson, C. Buckley, A. Stark, B. Pietruschka και B. Martincigh, «LC-MS/MS determination of antiretroviral drugs in influents and effluents from wastewater treatment plants in KwaZulu-Natal, South Africa,» *Chemosphere*, 20 February 2018.
- [15] J. Funke, C. Prasse και T. Ternes, «Identification of transformation products of antiviral drugs formed during biological wastewater treatment and their occurrence in the urban water cycle,» *Water Research*, 24 March 2016.
- [16] A. Medici, G. Luongo, M. Brigante, A. Zarrelli, M. DeNisco και G. Di Fabio, «Degradation Acyclovir Using Sodium Hypochlorite: Focus on Byproducts Analysis, Optimal Conditions and Wastewater Application,» *Molecules*, 9 August 2024.
- [17] L. Almeida, C. Mattos, P. Dinamarco, N. Figueiredo και D. Bila, «Chronic toxicity and environmental risk assessment of antivirals in *Ceriodaphnia dubia* and *Raphidocelis subcapitata*,» *Water Science & Technology*, August 2021.
- [18] A. J. Al-Rajab, L. Sabourin, D. Lapen και E. Topp, «The non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac is readily biodegradable in agricultural soils,» *Science of The Total Environment*, 1 December 2010.
- [19] S. Aydın, A. Ulvi, F. Bedük και M. Aydın, «Pharmaceutical residues in digested sewage sludge: Occurrence, seasonal variation and risk assessment for soil,» *Science of the Total Environment*, 6 January 2022.
- [20] K. Nachiappan και R. Chandrasekaran, «Microalgae: Nature's Green System to Recycle Waste to Resource,» *Natural Remedies*, 1 January 2023.